CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Dieymeson Lima Riguete
Gabriel Rodrigo de Sousa
Heberte Sebastião Leandro

ARC FLASH: ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE EM PAINÉIS ELÉTRICOS

NEPOMUCENO
2023

Dieymeson Lima Riguete, Gabriel Rodrigo de Sousa e Heberte Sebastião Leandro

ARC FLASH: ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE EM PAINÉIS ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Prof. Orientador: Dr. Felipe de Souza Delgado

Nepomuceno
2023

Dieymeson Lima Riguete, Gabriel Rodrigo de Sousa e Heberte Sebastião Leandro

ARC FLASH: ESTUDO DE ENERGIA INCIDENTE EM PAINÉIS ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Data de aprovação:
11/12/2023

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Felipe de Souza Delgado
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

_____
Prof. Me Lucas Silvestre Chaves
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

_____
Prof. Dr. Ricardo Vitor Ribeiro dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial a minha esposa, minha filha, minha Mãe, meu Pai e minha irmã, também a todos os meus amigos durante essa longa jornada. Além dos professores pelos conhecimentos compartilhados e compreensão. Por Dieymeson Lima Riguete.

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha mãe e meu irmão, que desde o início sempre esteve presente, também a todos meus amigos. Além dos professores que compartilharam seus conhecimentos ao longo dessa jornada. Em especial meu grande amigo "Zeus", pela companhia durante as madrugadas de estudo. Por Gabriel Rodrigo de Sousa

Dedico a conquista deste trabalho a vocês, que compartilharam comigo cada desafio e triunfo. Mãe, pai (in memoriam), irmãos, vocês são a razão pela qual cheguei aqui. Obrigado pelo amor incondicional e pelo apoio constante. Aos meus professores, cujo apoio e ensinamentos moldaram não apenas este TCC, mas também o meu percurso como estudante e ser humano. Por Heberte Sebastião Leandro

AGRADECIMENTOS

Por: Dieymeson Lima Riguete

Agradeço a Deus pela Oportunidade e capacidade de resiliência e saúde. Agradeço a minha família, em especial minha esposa Marina Breder Lourenço Riguete, minha filha Beatriz Lourenço Riguete, minha mãe Cremilda Lima Riguete e meu Pai Emilce Cardoso Riguete, a todos pelos diversos ensinamentos, quer tenha sido presencial ou em pensamento, sempre fortalecendo os meus objetivos, com palavras, momentos e ensinamentos foram fundamentais e importantes para me manter firme nesta trajetória.

Desde o conselho do meu Pai para continuar meus estudos, minha mãe capacitando e orando pela minha direção, minha esposa pela compreensão e força nos momentos de dificuldade e minha filha pelo presente de ser pai e fortalecer meu objetivo de ser um exemplo para ela. E não poderia deixar de agradecer a todos meus amigos pela compreensão, carinho, amizade e força de sempre, diversos momentos perto e distantes foram tornando esse momento especial.

AGRADECIMENTOS

Por: Heberte Sebastião Leandro

A Deus, fonte de toda sabedoria e força, que iluminou meu caminho e me concedeu a graça de concluir esta jornada acadêmica. Sua presença constante foi minha inspiração e sustento. Jesus Cristo, meu guia e exemplo de perseverança, agradecem por ser a rocha inabalável em que encontrei apoio durante os desafios desta trajetória. Sua graça me foi suficiente em todos os momentos.

Aos professores, em especial ao Doutor Felipe Delgado, nosso orientador, mentor, dedicado que guiaram nossos aprendizados com paciência e conhecimento. Suas lições foram além das salas de aula. À minha família, alicerce seguro e fonte inesgotável de amor e apoio. Cada conquista é também de vocês, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando-me a alcançar meus sonhos.

Aos amigos, Vitor Da Cunha De Souza, Dieymesson Lima Riguete, Gabriel Rodrigo De Souza Luiz, verdadeiros companheiros de jornada, agradeço por compartilharem conhecimentos, risos, desafios e vitórias. A amizade de vocês fez esta jornada acadêmica mais rica e significativa. À Alanis Carolina De Oliveira Moreira, que com paciência e compreensão, esteve ao meu lado nos altos e baixos. Sua presença trouxe luz aos meus dias e alegria aos meus momentos de desafio.

Por fim, meu agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para este percurso, meu mais sincero agradecimento. Este trabalho é fruto de esforço coletivo e amor compartilhado. Que este trabalho possa ser uma pequena contribuição para o conhecimento e que os frutos colhidos sejam dignos de toda a gratidão expressa nesta dedicatória.

AGRADECIMENTOS

Por Gabriel Rodrigo de Sousa

Primeiramente, agradeço a Deus, pois sem ele nada é possível, e agradeço a minha família pelo apoio incondicional. Seus encorajamentos, conselhos e amor foram a bússola que guiou meus passos ao longo dessa jornada. Cada desafio superado é também mérito de vocês, que sempre acreditaram no meu potencial.

Aos meus amigos, que compartilharam não apenas risos e momentos alegres, mas também estenderam suas mãos nos momentos de dificuldade, agradeço por serem a rede de suporte que me manteve firme durante os altos e baixos desta jornada.

Aos meus professores e orientadores, que dedicaram seu tempo e conhecimento para guiar meu desenvolvimento acadêmico, expresso minha profunda gratidão. Suas orientações foram cruciais para o amadurecimento das minhas ideias e para a concretização deste trabalho. Cada pesquisa, cada desafio enfrentado contribuiu para o crescimento que experimentei ao longo deste processo. Este trabalho não é apenas uma conquista individual, mas o resultado do apoio coletivo que recebi.

Que este agradecimento não seja apenas um registro formal, mas sim um reflexo sincero da minha apreciação por cada pessoa que cruzou meu caminho durante esta jornada. O conhecimento adquirido vai além dos livros e das salas de aula, ele se estende às relações e aprendizados proporcionados por cada um de vocês.

RESUMO

Esta pesquisa provê uma visão geral de estudos, resultados de pesquisas e normas nacionais e internacionais sobre arcos e sua energia incidente. Tem como objetivo definir os conceitos de curto-circuito e arco elétrico e identificar seus perigos específicos, além de apresentar os métodos para especificar roupas de proteção contra queimaduras por arco eléctrico. As queimaduras geradas por um acidente decorrente da exposição à energia do arco elétrico, são uma das principais causas de lesões elétricas no local de trabalho. Para os trabalhadores que trabalham constantemente em sistemas elétricos energizados, isto representa um perigo grave e requer cautelas extremas, além da utilização de EPIs e vestimentas que possam suportar o calor liberado durante um curto circuito. Este trabalho apresenta as características dos arcos elétricos e suas causas, para conscientizar e dar abrangência ao leitor sobre a importância do uso de equipamentos de proteção individual nas atividades executadas em sistemas elétricos.

Palavras chave: Energia incidente; arco elétrico; distância segura de trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vítimas de queimaduras e percentual de sobrevivência. 15

Figura 2: Representação do sistema elétrico a ser estudado 28

Figura 3: Placa de sinalização de advertência com resultados dos cálculos 380V 31

Figura 4: Placa de sinalização de advertência com resultados dos cálculos 13,8kV 34

Figura 5: Representação gráfica de Energia Incidente x Corrente de Arco Elétrico 34

Figura 6: Energia incidente (Y) x Tempo de Operação (X) 35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constantes de corrente de arco 20

Tabela 2: Fatores para equipamentos e classes de tensão 22

Tabela 3: Tempo de abertura para disjuntores de potência 24

Tabela 4: Tipo de equipamento e distância típica entre barramentos 24

Tabela 5: Tipos de equipamentos e distância típica de trabalho 25

Tabela 6: Dados coletados em campo para cálculo da energia incidente 28

Sumário

DEDICATÓRIA 4
AGRADECIMENTOS 5
AGRADECIMENTOS 6
AGRADECIMENTOS 7
RESUMO 8
LISTA DE FIGURAS 9
1. INTRODUÇÃO 12
1.1 Relevância 12
2. OBJETIVOS 13
2.1 Objetivo do estudo 13
2.2 Metodologia 13
2.3 Organização do trabalho 13
3. QUEIMADURAS 14
3.1 Introdução 14
3.2 Classificação das queimaduras 16
3.3 Gravidade das queimaduras 17
4. ARCO ELÉTRICO: ANÁLISE DETALHADA 17
4.1 Estudo do arco elétrico 17
4.2 Arco elétrico 18
5. METODOLOGIA E CÁLCULOS DE ENERGIA INCIDENTE 19
6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DO CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE 27
7. CONCLUSÃO 36
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 37

1. INTRODUÇÃO

Esta parte do trabalho é uma introdução que apresenta a relevância do tema, objetivo, metodologia e organização do trabalho.

1.1 Relevância

A maioria dos trabalhadores que operam equipamentos elétricos são feridos pela energia liberada pelo arco. Apesar da crescente preocupação dos consumidores em geral, esta questão ainda gera baixa preocupação e poucos estudos específicos, se em comparação com outros tipos de perigos associados à eletricidade, tais como eletrocussão, incêndio e outros aspectos da segurança no local de trabalho.

A maioria dos trabalhadores envolvidos em atividades nos sistemas elétricos são frequentemente expostos à certas condições enquanto trabalham dentro de painéis, como curtos-circuitos que causam arcos voltaicos. Dessa forma, o arco emite energia incidente que pode causar queimaduras, fazendo com que os trabalhadores sofram lesões como absenteísmo (temporário ou permanente), prolongamento do tempo de retorno ao desempenho de suas funções, etc. Estas consequências criam uma série de problemas para as empresas, pois podem levar à redução da produtividade devido ao absentismo dos funcionários e, em casos mais graves, à morte. Além disso, pode haver custos para a empresa, danos à sua imagem e reputação e custos para a família da vítima. Por todos estes motivos, é importante que o dispositivo de proteção funcione de forma eficiente e rápida para interromper o fluxo de energia elétrica.

O tema proposto neste trabalho é o estudo da energia incidente do arco, abrangendo diversos temas da engenharia elétrica, como os sistemas de potência e proteção de sistemas elétricos. Os tópicos serão abordados seguindo as etapas da norma IEEE 1584-2018, abordando todas as etapas para calcular a energia incidente de um arco. A determinação da energia incidente permite determinar e especificar os EPI – Equipamento de Proteção Individual e roupas necessários para proteger os trabalhadores de equipamentos elétricos. Além disso, pode-se determinar a distância mínima de segurança perto do painel de distribuição e demonstrar a necessidade de instalar detectores de arco dentro do painel de distribuição. Ou seja, a relevância deste trabalho reside na melhoria da segurança dos trabalhadores em sistemas elétricos.

A norma que regulamenta o fornecimento de EPIs no Brasil é a Norma Regulamentadora 06, que estabelece as exigências legais para proteção dos trabalhadores contra os riscos à saúde e a vida.

Além disso, é muito importante que os trabalhadores possuam EPIs adequados e em boas condições de uso, conheçam o risco, as barreiras de segurança e, assim, possam manobrar e intervir nos equipamentos de forma segura. recomendações para proteger você e seus companheiros.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo do estudo

Todos os sistemas e circuitos elétricos possuem particularidades e características que determinam diferentes tipos de riscos aos trabalhadores. Como objetivo deste trabalho definiu-se por analisar a exposição dos trabalhadores à energia emitida pelo arco em painéis elétricos e minimizar esse risco com a especificação correta para fornecimento e uso das vestimentas adequadas, além da sinalização de advertência.

Para compor o objetivo deste trabalho, é parte importante as etapas de levantamento de campo dos equipamentos do circuito, executar as etapas de cálculo do nível de energia incidente, assim conhecendo o risco, avaliar a intensidade e gravidade de uma queimadura derivada da energia que é desprendida de um arco elétrico. E por fim, apresentar o memorial de cálculo de determinação da energia incidente, distância de segurança e os EPIs adequados.

2.2 Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste em um estudo sobre a norma IEEE 1584-2018 “IEEE Guide for Performing Arc Flash Calculations” que descreve o passo a passo necessário para cálculo da energia incidente proveniente de um arco elétrico e aplicações. Para compor a metodologia de cálculo completa a abordagem completa e detalhada é feita no capítulo cinco deste trabalho, apresentando as etapas da norma, e no capítulo seis um estudo de caso.

Para este estudo foi utilizado um diagrama unifilar de um circuito de 13,8kV / 380V, comum nas instalações industriais, onde as informações de corrente de curto circuito e carga são fornecidos pelo fabricante.

2.3 Organização do trabalho

A divisão deste trabalho se dá em seis capítulos, sendo o primeiro com a introdução,

breve descrição do tema e relevância. O segundo capítulo aborda o tema de queimaduras, destacando-se a gravidade e importância dos cuidados.

O terceiro capítulo descreve o conceito de arco elétrico, sendo este a origem da energia incidente e o motivador deste trabalho.

O quarto capítulo apresenta a metodologia com cálculo da energia incidente e corrente de arco elétrico. Além disso, apresenta-se o modelo matemático baseado na norma IEEE para a determinação do grau de caloria e vestimentas adequadas.

O quinto capítulo que a apresenta um estudo da energia incidente na qual é realizado o estudo de caso de um circuito elétrico 13,8kV / 380V, comum em instalações industriais.

Por fim o capítulo seis apresenta as conclusões deste estudo e trabalhos futuros.

3. QUEIMADURAS

3.1 Introdução

As queimaduras provenientes de arcos elétricos apresentam uma ameaça considerável em comparação com outros riscos, como choques, campos magnéticos e incêndios. Este capítulo aborda detalhadamente as queimaduras relacionadas aos arcos elétricos, fornecendo informações sobre suas classificações e gravidade.

Entende-se uma queimadura como o resultado direto ou indireto do calor agindo sobre o corpo humano [Fischer]. Mesmo com os avanços recentes na medicina, em específico no tratamento de grandes queimaduras, as taxas de mortalidade e morbidade ainda são consideráveis. Os métodos preventivos utilizados até agora não conseguiram mudar de forma substancial a situação dramática do estado epidemiológico das queimaduras.

Quando o tema é direcionado para queimaduras causadas por corrente elétrica, elas afetam o corpo através da pele. Nos casos de acidentes elétricos, as vítimas geralmente sofrem queimaduras devido à alta resistência da pele, levando a alterações estruturais conhecidas como "marcas de corrente". Diferente dos demais tipos que queimaduras como químicas, térmicas e biológicas, as causadas pela eletricidade são menos dolorosas, isso se dá porque a corrente pode destruir as terminações nervosas. No entanto, isso não reduz o perigo, pois tendem a progredir em profundidade mesmo após interromper o contato com arco elétrico.

O arco elétrico, por sua vez, libera uma quantidade considerável de energia em um curto

período de tempo, movendo-se a cerca de 100 m/s, podendo atingir temperaturas até duas vezes superiores às do sol, alcançando cerca de 20.000°C. Esse nível de caloria é suficiente para queimar metais, liberar gases tóxicos, e se durar mais de 100 milissegundos, representa um risco significativo de queimaduras graves, representando um grande risco para pessoas e equipamentos.

Nos casos que o arco elétrico dura mais de 500 milissegundos, pode ocorrer explosão e, desta forma, causar danos irreparáveis aos equipamentos e a perda de vidas humanas. Além disso, o arco elétrico tem energia para queimar roupas, causar sérias lesões na pele, além da capacidade de provocar incêndios, que emitem vapores ionizados e raios ultravioletas (F. L. Claudio, 2021).

Ao contrário das queimaduras que são causadas por outras fontes de calor externas, as que são provocadas pelo arco elétrico têm uma intensidade maior, podendo-se dizer que queima com mais intensidade internamente do que externamente. Frequentemente, são necessárias extensas intervenções cirúrgicas que em alguns casos, resultam em amputações. Portanto, é crucial treinar e capacitar todos os profissionais que trabalham em atividades envolvendo eletricidade, para reduzir os riscos de exposição a essas queimaduras originadas por arcos elétricos (L. K. Tomivoshi, 2015).

De acordo com um estudo da ABA (American Burn Association), realizado nos Estados Unidos entre 1991 e 1993, que foi revisado em 2002, a estatística de sobrevivência de vítimas de lesões, devido queimaduras varia de acordo com a idade, que ilustrado no gráfico a representação que a maioria um percentual relevante das vítimas de acidentes elétricos tem queimaduras de terceiro grau confirmada, o que pode resultar na morte de uma pessoa, a depender da gravidade, conforme observa-se na Figura 1.

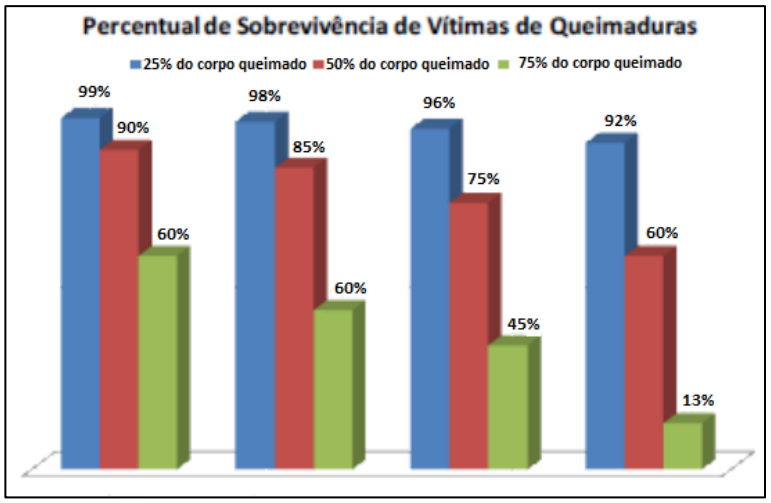

Figura 1: Vítimas de queimaduras e percentual de sobrevivência (L. K. Tomivoshi, 2015)

3.2 Classificação das queimaduras

Em geral as queimaduras são avaliadas e classificadas quanto ao seu grau de intensidade, é crucial considerar alguns fatores nestas avaliações, como por exemplo a profundidade, extensão e localização da queimadura, a idade da vítima, condições médicas pré-existentes, além de fatores agravantes como por exemplo a inalação de fumaça.

A avaliação da intensidade e gravidade de uma queimadura deve ser feita por especialista médico, durante a avaliação, o local da queimadura deve ser mantido aquecido, e a pele deve ser examinada em partes para minimizar a perda de líquidos por evaporação (F. L. Claudio, 2021).

A avaliação das queimaduras é classificada como: queimaduras de Primeiro, Segundo e Terceiro Grau. As queimaduras classificadas como Primeiro Grau possuem características de ser queimaduras superficiais, atingindo apenas a epiderme ou a camada externa da pele, causando vermelhidão. Elas são acompanhadas por calor e dor, mas não formam bolhas. As queimaduras de primeiro grau evoluem com descamação em poucos dias e geralmente desaparecem sem deixar cicatrizes. O tratamento é ambulatorial e envolve controle da dor e cuidados locais na área queimada (F. L. Claudio, 2021) (L. K. Tomivoshi, 2015).

As queimaduras de Segundo Grau afetam completamente a epiderme e parcialmente a derme. Essas queimaduras causam dor, edema, formação de bolhas e ulceração. Elas geralmente se regeneram espontaneamente, a partir dos anexos cutâneos. No entanto, a cicatrização é mais lenta, levando de 2 a 4 semanas, e pode resultar em sequelas, como discromia (superficial) e cicatrizes (profundas).

Já para as queimaduras de terceiro grau, que são extremamente graves, podem até destruir todas as camadas da pele, alcançando até o tecido subcutâneo, podendo afetar tendões, ligamentos, músculos e ossos. Elas se manifestam como lesões brancas ou marrons, secas, duras e inelásticas. Dada a sua profundidade, essas queimaduras são indolores e não apresentam regeneração espontânea, exigindo procedimentos de enxertia para tratamento. Em alguns casos, essas queimaduras podem cicatrizar eventualmente, mas geralmente resultam em retração das bordas da lesão (F. L. Claudio, 2021) (L. K. Tomivoshi, 2015).

Ao avaliar uma vítima com queimaduras, para prestar os primeiros socorros é essencial coletar algumas informações sobre o incidente, procurando identificar possíveis lesões referente a exposição e inalação de fumaça, além de tratamentos prévios que podem ter sido realizados. Se possível, um breve relato deve ser coletado para melhores ações, incluindo informações sobre doenças, medicamentos, alergias e vacinações. Além disso durante o atendimento de primeiros socorros à vítima, é muito importante manter a calma. Também é importante não se deixar impressionar pelo aspecto chocante da queimadura, que pode desviar a atenção do socorrista e ocultar lesões frequentemente mais graves, como traumas neurológicos, ortopédicos e outros.

Quando as queimaduras afetam o rosto e o pescoço, são consideradas graves, pois podem comprometer as vias respiratórias. Em casos de queimaduras elétricas, é essencial lembrar do risco de parada cardiorrespiratória devido a arritmias cardíacas. Após avaliar a queimadura e as condições respiratórias e circulatórias, é necessário todas a informações e socorro prestado para o médico especialista que examinará o acidentado (L. K. Tomivoshi, 2015).

3.3 Gravidade das queimaduras

Em geral a gravidade de uma queimadura é avaliada de acordo com o percentual de atingimento no corpo do acidentado, sendo:

- Menor que 15%: portador de queimaduras;
- Mais de 15%: grande queimado;
- Maior de 40%: risco de morte;
- Maior de 70%: sobrevida mínima.

A queimadura grave tem as seguintes características:

- Insuficiência respiratória ou potencial (quando atinge rosto e pescoço);
- Segundo ou Terceiro Grau maior que 10% em crianças e 15% em adulto;

Sendo assim essas avaliações e prescrições de medição devem ser feita somente por médico especialista, indicando as ações de forma eficaz e urgente de acordo com a avaliação. Deve ser realizado o tratamento com medicação para recuperação completa do local afetado no trabalhador

4. ARCO ELÉTRICO: ANÁLISE DETALHADA

O propósito neste capítulo é detalhar e explorar o fenômeno do arco elétrico, que é o principal objeto de estudo da energia incidente. De forma a introduzir o tema, será apresentado um estudo do arco elétrico, trazendo uma visão sobre a evolução das pesquisas. Na sequência, será definido o arco elétrico e apresentados as suas características e causas.

4.1 Estudo do arco elétrico

Estudos mais aprofundados sobre os arcos elétricos e suas consequências tiveram início em 1982, com a publicação do artigo de Ralph Lee com título de "*The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*". [R.H. Lee] Nesse artigo, ele definiu o arco elétrico, descrevendo principalmente suas características e suas impactos, e também avaliando as distâncias alcançadas e atingidas pela explosão durante um arco elétrico. A proporção deste trabalho possibilitou alcançar e sensibilizar várias empresas sobre a importância e relevância do desenvolvimento de métodos de proteção contra o arco elétrico (L. K. Fischer, 2004)

Mais adiante em 1987, Ralph Lee publicou outro artigo desta vez com título de "*Pressures Developed from Arcs*", no português pressões desenvolvidas a partir de arcos elétricos, no qual ele explorou as relações entre correntes elétricas, pressão e distâncias do arco elétrico. [Tomivoshi]. Já no mesmo ano, *Doughty et al*. divulgaram o estudo "*Testing Update*

on Protective Clothing and Equipment for Electric Arc Exposure". Neste trabalho, seus idealizadores calcularam os níveis de energia incidente para sistemas elétricos de baixa tensão, visando conseguir determinar os EPIs - Equipamentos de Proteção Individual adequados para as atividades com segurança (L. K. Tomivoshi, 2015). Esses dois estudos atingiram marcas de um avanço significativo na compreensão dos arcos elétricos e na melhoria dos equipamentos de segurança.

Os estudos sobre o tema seguiram avançando, e no ano de 2000, outros pesquisadores, *Dought, Floyd e Neal*, escreveram um artigo baseado nas suas pesquisas com a realização de testes em configurações abertas e fechadas envolvendo arcos elétricos, utilizando uma tensão de 600V, artigo este com título de "*Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600V Power Distribution Systems*" que em português significa "Previsão de energia incidente para gerenciar melhor o risco de arco elétrico em sistemas de distribuição de energia de 600V".

Como resultado importante desta pesquisa foi que, em configurações fechadas, painéis, o calor refletia nas paredes, gerando uma tendência de empurrar e abrir sua porta, causando assim um risco adicional (L. K. Tomivoshi, 2000).

Com o avanço destes estudos, foi publicada em 2002, a norma que orientou o desenvolvimento deste trabalho, a IEEE 1584-2002 "*IEEE Guide for Performing Arc Flash Calculations*" (R. H. Lee, 2002). Esta norma descreve o passo a passo para calcular a corrente do arco elétrico, a energia incidente e as distâncias de segurança para sistemas elétricos com tensão entre 208V e 15000V. Os modelos utilizados e desenvolvidos são baseados em observações de testes e outros estudos. Já para sistemas elétricos com tensões maiores que 15000V, a norma apresenta o modelo de Ralph Lee. No ano de 2004, a norma foi encorpada com algumas observações, baseadas em dados de outros estudos e observações de pesquisas, assim sendo lançada uma nota explicativa (R. H. Lee, 2002).

4.2 Arco elétrico

Um arco elétrico, basicamente é uma descarga elétrica contínua que ocorre através de um meio dielétrico, por exemplo o ar, entre dois condutores com diferença de potencial. Esse fenômeno é caracterizado pela ionização do meio isolante, permitindo a passagem de corrente elétrica entre os condutores. Quando a tensão elétrica entre os condutores é suficientemente alta, ela supera a resistência do isolante e cria um caminho condutor através do ar. Esse fenômeno ocorre quando o campo elétrico entre os terminais dos condutores é extremamente intenso, causando uma ruptura dielétrica no isolante, permitindo a condução de corrente entre os condutores.

Desta forma, quando o ar está ionizado, os elétrons livres se movem do cátodo para o ânodo, ou seja, de um eletrodo para o outro. No momento dessa migração, acontecem choques, colisões entre os elétrons e os átomos do dielétrico. Neste fenômeno as colisões ocasionam na transferência de um elétron de uma órbita atômica interna para uma órbita externa, levando à excitação dos átomos (T. C. Peixoto, 2008). Quando os elétrons retornam ao seu fluxo original,

liberam energia na forma de calor devido a ocorrência dessas colisões. Se o elétron não retornar ao seu fluxo original, ele continua seu caminho em direção ao outro eletrodo, formando a parte do arco elétrico chamada de plasma (T. C. Peixoto, 2008). Esse plasma é altamente condutor, permitindo a passagem de corrente elétrica.

Os arcos elétricos são constantemente encontrados em sistemas elétricos de alta tensão, mas também podem ocorrer em sistemas de baixa tensão em situações específicas, como em curtos-circuitos. Eles são acompanhados por calor intenso, luz intensa, pressão sonora e podem ser perigosos devido à sua alta temperatura e potencial de causar danos a equipamentos e pessoas. Portanto, medidas de segurança adequadas são necessárias para prevenir acidentes relacionados a arcos elétricos.

Baseado neste conteúdo descrito, fica evidente que o campo elétrico é o principal elemento na formação do arco elétrico. Isso ocorre à medida que o campo elétrico aumenta, é acelerado a migração dos elétrons que promove a ionização do meio dielétrico, assim resulta, no aumento também da corrente elétrica. Esse processo continua até atingir uma fase conhecida como a região de transição, na qual a descarga se torna luminosa e capaz de se manter independentemente de estímulos externos (T. C. Peixoto, 2008).

A partir deste momento, a corrente e a tensão aumentam de forma considerável, ocasionando uma elevação progressiva da temperatura do cátodo. E acontece que neste momento, os efeitos térmicos tornam-se predominantes, gerando uma grande transmissão de calor por radiação. É nesse momento que o arco elétrico ocorre efetivamente, caracterizando o estágio em que a energia é liberada na forma de luz, calor e som devido ao intenso calor gerado pela corrente elétrica.

Basicamente o arco elétrico é divido em duas partes, sendo os terminais e o plasma. Nos terminais, parte que corresponde aos metais dos condutores que são interrompidos, local onde ocorre as maiores temperaturas na casa de 20000K (MTE-NR6, 2004). No plasma são as fagulhas entre os condutores, onde as temperaturas alcançam patamares menores, em torno de 13000K (R. H. Lee, 2002).

Para parâmetro de comparação, a temperatura do sol, é em torno de 5000K (MTE-NR6, 2004). Dessa forma podemos associar o quão alto é a temperatura desprendida durante um arco elétrico, e o quão intenso pode ser o impacto de um acidente, queimadura, causada por um arco elétrico. E o momento em que o trabalhador está mais exposto a essa situação é durante manobras de isolamento ou retorno de carga, inspeções visuais em sistemas abertos. Devido as altas temperaturas mesmo à distancias consideráveis podem ocorrer queimaduras, que varia de acordo com nível de tensão do sistema, e também o grau de queimadura que pode ocorrer. Estes eventos deixam claro a importância do estudo de nível de energia incidente nos sistemas elétricos para propiciar as empresas medidas de proteção para o trabalhador, seja com EPIs ou barreiras físicas.

5. METODOLOGIA E CÁLCULOS DE ENERGIA INCIDENTE

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia para cálculo de energia

incidente além das variáveis de um arco elétrico, aplicando o passo a passo da norma IEEE 1584, utilizada amplamente nas instalações industriais.

No caso da utilização da norma IEEE-1584, devemos seguir os limites descritos a seguir:

- Tensão trifásica de 208V a 15.000V;
- Frequência 50 Hz ou 60Hz
- Corrente de curto-circuito: simétrica

  208 V á 600 V: 500 A – 106000A

  601 V a 15000V: 200A – 65000A
- Distância entre eletrodos:

  208 V á 600 V: 6,35mm – 76,2mm

  601 V a 15000V: 19,05mm – 254,0mm

Foi segmentado em classes de tensão para obter uma melhor aproximação dos cálculos, sendo elas:

- 270V
- 600V
- 14300V

A norma contém algumas etapas importantes de conhecer na instalação, para as diferentes configurações dos circuitos principalmente sendo aberto “open” ou fechado “closed”, sendo considerado cinco configurações, são elas:

- VCB: (Condutor Vertical na Caixa)
- HCB: (Condutor Horizontal na Caixa)
- VOA: (Condutor Vertical Operação Livre)
- HOA: (Condutor Horizontal Operação Livre)
- VCBB: (Condutor Vertical na Caixa com Barreira) (IEEE-1584, cap. V).

Assim sendo tratado como baixa tensão as aproximações feitas até o valor de 600V. Para uma tensão de 690V, por exemplo, é tratado como interpolação, essa mesma metodologia se repete para baixa e média tensão. Por todas essas mudanças é estabelecido um roteiro para o cálculo para tensões até 600V (baixa tensão). No cálculo de interpolação deve ser considerado a Tabela 1, que representa as constantes de corrente de arco, que para cada nível de tensão estudado utiliza-se uma constante, por exemplo, para uma tensão de 600V, com característica VCB, utiliza-se as constantes representadas na horizontal da tabela, em aplicando nas fórmulas de cálculo, descrita nas próximas etapas.

Tabela 1 – Constantes de corrente de arco

E.C. I V		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}
VCB	600V	-0,04287	1,035	-0.083	0	0	-4,783E-09	1.962E-06	-0_000229	0,003141	1,092
	2700V	0,0065	1,001	-0,024	-1,557E-12	4,556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0,003191	0,9729
	14300V	0,005795	1,015	-0,011	-1,557E-12	4,556E-10	-4.186E-08	8,346E-07	5.482E-05	-0,003191	0,9729
YCBB	600V	-0,017432	0,98	-0,05	0	0	-5.767E-09	2.524E.-06	-0.00034	0,01187	1,013
	2700V	0,002823	0,995	-0,0125	0	-9,204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0,0001569	-0,004003	0,9825
	14300V	0,014827	1,01	-0,01	0	-9,204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0,0001569	-0,001003	0,9825
HCB	600 V	0,054922	0,988	-0,11	0	0	-5.382E-09	2,316E-06	-0.000302	0,0091	0,9725
	2700V	0,001011	1,003	-0,0249	0	0	4.859E-10	-1.814 E-07	-9 .128E-06	-0,0007	0,9881
	14300V	0,008693	0,999	-0,02	0	-5,043E-11	2.233E-08	-3.046E-06	0.000116	-0,001145	0,9839
VOA	600 V	0,043785	1,04	-0,18	0	0	-4.783E.-09	1.962E-06	0.000229	0,003141	1,092
	2700V	-0,02395	1,006	-0,0188	-1,557E-12	4,556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0,003191	0,9729
	14300V	0,005371	1,0102	-0,029	-1,557E-12	4,556E-10	-4_1 86E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0,003191	0,9729
HOA	600 V	0.111147	1,008	-0,24	0	0	-3_895E-09	1.641E-06	-0,000197	0,002615	1,1
	2700V	0,000435	1,006	-0,038	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0,0007	0,9981
	14300V	0,000904	0,999	-0,02	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0,0007	0,9981

Fonte (IEEE-1584, cap. V)

Para determinar a energia incidente por este método deve-se utilizar 9 etapas, conforme demonstradas a seguir

1° etapa: coletar dados do sistema/instalação

Nesta etapa é necessário coletar os dados do sistema elétrico a ser estudado, como diagramas unifilares atualizados, considerando circuitos de baixa tensão e possíveis alimentadores alternativos. Deve ser incluído na coleta de dados fontes de energia incluindo a concessionária, geradores, motor acima de 37 kW (que contribuem de maneira significativa para os valores de curto circuito). Também deve considerar painéis, cubículos, incluindo motores menores que 600V e transformadores de instrumentos e proteção. Os equipamentos abaixo de 240V não necessitam ser considerados a não ser que possuam potência mínima de 125 kVA. [11]

2° etapa: determinação dos modos de operação do sistema/instalação

De acordo com a IEEE 1584, sistemas radiais (quando a subestação ou estação geradora está localizada no centro dos consumidores), só existe um modo de operação normal, porém existem sistemas mais complexos que possuem outros modos de operação, como por exemplo, consumidores com geradores operando em paralelo com a concessionária, CCM's (centro de comando de motores) com um ou mais alimentadores diferentes, ou seja, dependendo da instalação esse modo de operação pode alterar.

3° etapa: determinação da corrente de curto-circuito

A norma IEEE recomenda que nesta etapa os dados coletados sejam inseridos em um software para cálculo da corrente de curto circuito. Existem diversos programas e softwares comerciais com diversas possibilidades que facilitam e mitigam a possibilidade de erro nos cálculos, permitindo inserir diversos dados e variar a entrada de informações de acordo com a instalação.

Além disso a norma indica que a corrente de curto circuito deve ser calculada principalmente nos pontos da instalação em que os trabalhadores desenvolvem as principais atividades da rotina, para melhor aderência a realidade do estudo (IEEE-1584, cap. V).

4° etapa: determinação da corrente de arco elétrico

Etapa de determinação da corrente de arco elétrico, nos pontos de interesse e principais risco de arco elétrico e a proteção a montante.

A corrente de arco elétrico depende principalmente dos valores da corrente de curto circuito, determinado na etapa anterior. Assim a corrente de arco elétrico pode ser calculada pela aplicação das equações determinadas na norma, sendo dividido para níveis de tensão até 1kV (baixa tensão) e outra para valores entre 1 kV e 15kV (média tensão).

Para tensões abaixo de 1kV, utilizar a seguinte equação:

$$\log Ia = K + 0{,}662 \log Ibf + 0{,}0966V + 0{,}000526G + 0{,}5588V(\log Ibf) - 0{,}00304G\ (\log Ibf) \quad (1)$$

Onde:

- Log= logaritmo na base 10;
- Ia = corrente do arco elétrico, em kA;
- K = é -0,153 para arco em ambiente aberto, e -0,097 para arco em ambiente fechado;
- Ibf = Corrente de curto circuito para falta trifásica, em kA;
- V = tensão do sistema, em kV;
- G = distância entre condutores, em mm.

A distância G entre condutores apresentada na equação (1) é obtida na Tabela 2, determinadas pela norma IEEE-1584, a seguir:

Tabela 2 – fatores para equipamentos e classes de tensão

Tensão do sistema (kV)	Tipo de Equipamento	Distância típica entre condutores (mm)	Distância X Fator
0,208 - 1,0	Ambiente aberto	10-40	2,000
	Painel de distribuição	32	1,473
	CCM e Painel	25	1,641
	Cabos	13	2,000
>1 - 5	Ambiente aberto	102	2,000
	Painel de distribuição	13-102	0,973
	Cabos	13	2,000
>5 - 15	Ambiente aberto	13-153	2,000
	Painel de distribuição	153	0,973
	Cabos	13	2,000

Fonte (IEEE-1584, cap. V)

Para tensões entre 1kV e 15kV, não há distinção entre ambiente fechado e aberto, e deve-se utilizar a seguinte equação:

$$\log Ia = 0{,}00402 + 0{,}983 \log Ibf \quad (2)$$

Onde:

- Log= logaritmo na base 10;
- Ia = corrente do arco elétrico, em kA;
- Ibf = Corrente de curto circuito para falta trifásica, em kA;

Em seguida, é necessário realizar a conversão do logaritmo, utilizando a seguinte equação:

$$Ia = 10^{\log Ia} \quad (3)$$

Esta etapa é necessária ainda calcular uma segunda corrente do arco elétrico equivalente a 85% da Ia, com objetivo de determinar um segundo tempo de duração do arco. Este segundo tempo é responsável pelas variações na corrente de arco e no tempo de atuação do dispositivo de proteção.

5° etapa: encontro das características dos dispositivos de proteção e o tempo de duração do arco

Para esse levantamento recomenda-se que os dados do sistema de proteção sejam retirados dos equipamentos instalados ou a serem instalados. Para se obter o tempo de interrupção deve-se atentar a alguns parâmetros, para fusíveis, curvas de tempo/corrente dos fabricantes podem incluir o tempo de fusão e de interrupção, assim adotar somente o tempo de

interrupção. Caso o fabricante forneça somente a média do tempo de fusão, deve-se adicionar 15%, desde que esse tempo seja até 0,03 segundos. Para tempos maiores que 0,03 segundos somar somente 10%. Essas somas tem objetivo de determinar o tempo total de interrupção.

Ainda para disjuntores que são operados por relés, operando na região instantânea, considera-se a sua operação em 0,016 segundos, à frequência de 60 Hz, devendo adicionar o tempo para abertura do disjuntor.

A Tabela 3 a seguir apresenta os valores de tempos de abertura para disjuntores de potência segundo a norma, IEEE-1584, cap. V.

Tabela 3 – tempo de abertura para disjuntores de potência

Tensão e tipo de disjuntor	Tempo de abertura em 60 Hz (ciclos)	Tempo de abertura (s)
Baixa tensão (<1 kV), caixa moldada e relé de proteção integrado	1,5	0,025
Baixa tensão (<1 kV), caixa isolada com relé de proteção integrado ou operado por relé externo	3,0	0,050
Média Tensão (1 a 35 kV)	5,0	0,080
Alta tensão (> 35 kV)	8,0	0,130

Fonte (IEEE-1584, cap. V)

6° etapa: determinação das tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos

Nesta etapa cada barramento é necessário obter a tensão do sistema e o tipo de equipamento, conforme a Tabela 4, visando o objetivo de verificar a distância entre barramentos.

Tabela 4 – tipo de equipamento e distância típica entre barramentos

Tipo de equipamento	Distância típica entre os barramentos (mm)
Painel de 15 kV	152
Painel de 5 kV	104
Painel de baixa tensão	32
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	25
Cabos	13
Outros	Não necessário

Fonte (IEEE-1584, cap. V)

7° etapa: determinação da distância de trabalho

A Tabela 5 representa, conforme a IEEE 1584, as distancias típicas de trabalho de acordo com tipos de equipamentos. Sendo a distância típica de trabalho a soma da distância entre o corpo e face do trabalhador, e a frente do equipamento e a distância da frente do equipamento para a provável fonte do arco dentro do equipamento, segundo a IEEE-1584, cap. V.

Tabela 5 – tipos de equipamentos e distância típica de trabalho

Tipo de equipamento	Distância de trabalho típica (mm)
Painel de 15 kV	910
Painel de 5 kV	910
Painel de baixa tensão	610
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	455
Cabos	455
Outros	A ser determinada no campo

Fonte (IEEE-1584, cap. V)

8° etapa: cálculo da energia incidente em todos os equipamentos

Para realizar o cálculo de energia incidente, recomenda-se utilizar um software para estes cálculos. A norma estabelece primeiramente seja determinado o valor de energia incidente normalizada, baseado em valores de arco de 200ms de duração e uma distância de 610 mm entre a origem do arco e uma pessoa. Para esse cálculo utiliza-se a seguinte equação:

$$\log En = K1 + K2 + 1{,}081 * \log Ia + 0{,}0011 * G \quad (4)$$

Sendo:

- Log: logaritmo na base 10;
- En: Energia incidente normalizada (j/cm^2) para tempo de 200 ms e distância de 610 mm;
- K1: -0,792 para ambiente aberto e -0,555 para ambiente fechado;
- K2: 0 para sistema isolado ou aterrado por alta resistência e -0,113 para sistema solidamente aterrado;
- G: distância entre condutores em mm, conforme a tabela 2, etapa 4.

Em seguida, convertendo:

$$\mathrm{En} = 10^{\log \mathrm{En}} \tag{5}$$

E converter para energia incidente a partir da energia normalizada

$$\mathrm{E} = 4{,}184 * \mathrm{Cf} * \mathrm{En} * \left(\frac{\mathrm{t}}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^{\mathrm{x}}}{\mathrm{D}^{\mathrm{x}}}\right) \tag{6}$$

Sendo:

- E: Energia incidente (cal/cm^2);
- C_f: é um fator de cálculo que utiliza 1,0 para tensão acima de 1kV e 1,5 para tensão igual ou menor que 1kV;
- En: Energia incidente normalizada;
- t: tempo do arco (s);
- D: distância do provável arco para uma pessoa (mm);
- x: Fator de distância, conforme 2, etapa 4.

9° etapa: determinação da distância segura de aproximação contra arco elétrico.

Para determinar a distância segura de aproximação segue-se a equação abaixo, que também pode ser usada para determinar se o equipamento de proteção individual selecionado é adequado para evitar as lesões térmicas a uma distância especificada em caso de um arco elétrico, conforme a norma IEEE-1584, cap. V.

$$\mathrm{Db} = \left[4{,}184 * \mathrm{Cf} * \mathrm{En} * \left(\frac{\mathrm{t}}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^{10}}{\mathrm{Eb}}\right)\right]^{1/\mathrm{x}} \quad (7)$$

Sendo:

- Db: Distância de aproximação do ponto do arco (mm);
- C_f: é um fator de cálculo que utiliza 1,0 para tensão acima de 1kV e 1,5 para tensão igual ou menor que 1kV;
- En: Energia incidente normalizada;
- Eb: Energia incidente (J/cm^2) na distância de proteção;
- t: tempo do arco (s);
- x: Fator de distância, conforme 2, etapa 4.

6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DO CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE

Neste capítulo, são abordados resultados obtidos no estudo de caso de um circuito de alimentação de industrias de pequeno, médio e grande porte, comum na região da cidade de Nepomuceno-MG. Assim realizar o cálculo de energia incidente dos equipamentos que compõem este circuito elétrico, que é representado no unifilar da Figura 2, composto por uma fonte de alimentação com nível de tensão médio de 13,8 kV, além de um transformador abaixador 13,8kV/380V, que alimenta as cargas do painel 1 deste circuito com 380V.

A imagem a seguir, refere-se ao unifilar do circuito a ser estudado. Nesta representação pode-se observar desde a geração e passando pela distribuição, além do transformador 13,8kV/380V, disjuntor de entrada da alimentação do painel 02, que por sua vez faz a distribuição das saídas de carga dos diversos equipamentos.

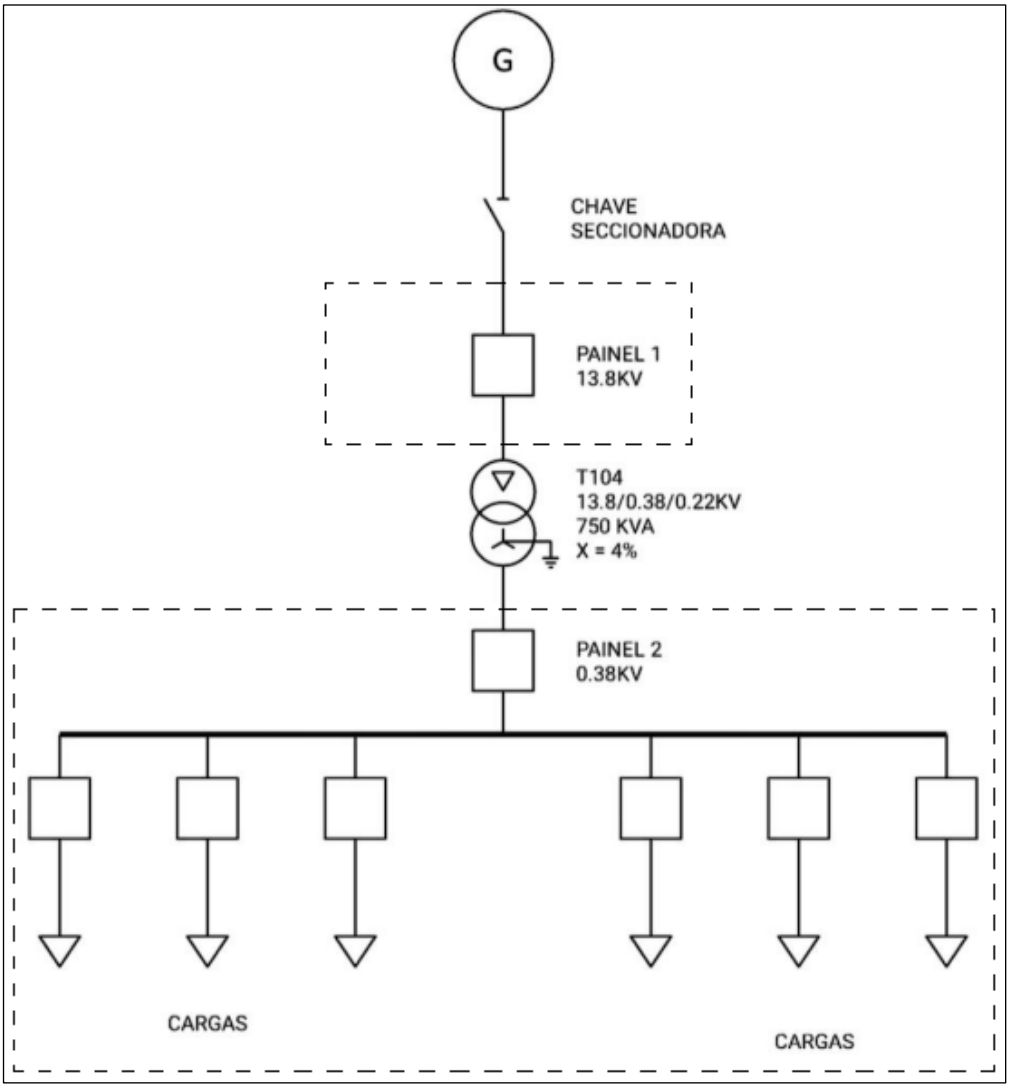

Figura 2: representa o diagrama unifilar do sistema elétrico a ser estudado (Autores)

Na tabela a seguir, contém todos os dados que foram levantados em campo, seguindo as etapas descritas no capítulo anterior, em conformidade com a norma IEEE, que são necessários para os cálculos da energia incidente.

Tabela 6 – dados coletados em campo para cálculo da energia incidente

Equipamento / Barramento	Tensão (kV)	Tipo de equipamento	Corrente de Curto Circuito Icc (kA)	K	Distância entre condutores (mm)	Distância típica de trabalho (mm)	Distância x Fator	Cf (fator de cálculo)
Painel 01 (alimentação)	13,8	HOA	45	-0,097	152	910	0,973	1
Painel 02 (distribuição)	0,38	VCBB	30	-0,097	25	457	1,641	1,5

Fonte: Autores

Sendo:

- HOA: Condutores/eletrodos horizontais ao ar livre;
- VCBB: Condutores/eletrodos verticais terminados em uma barreira isolante dentro de uma caixa/gabinete de metal;
- VCB: Condutores/eletrodos verticais dentro de uma caixa/gabinete de metal;
- Icc: Corrente de curto circuito;
- Iarc: Corrente de arco elétrico.

Com a descrição das etapas de cálculo conforme a norma IEEE, dados coletados em campo, informações tabeladas, diagrama unifilar conhecido, o próximo passo é apresentar detalhadamente todos os cálculos para o painel 01 e 02 do sistema.

Para nível de tensão 380V, seguem todos os cálculos detalhados.

- **1° cálculo de corrente de arco elétrico**

Sabendo que:

- Log= logaritmo na base 10;
- Ia = corrente do arco elétrico, em kA;
- K = -0,097, se tratando de painel;
- Ibf = Corrente de curto circuito para falta trifásica, 30kA;
- V = tensão do sistema 0,380kV;
- G = distância entre condutores, 25mm

Logo, substituindo os valores na equação 1:

$$\log \mathrm{Ia} = \mathrm{K} + 0{,}662\log \mathrm{Ibf} + 0{,}0966\mathrm{V} + 0{,}000526\mathrm{G} + 0{,}5588\mathrm{V}(\log \mathrm{Ibf}) - 0{,}00304\mathrm{G}\,(\log \mathrm{Ibf})$$

$$\log \mathrm{Ia} = -0{,}097 + 0{,}662\log(30) + 0{,}0966(0{,}380) + 0{,}000526(25) + 0{,}5588(0{,}38)(\log 30) - 0{,}00304(25)\,(\log 30)$$

$$\log \mathrm{Ia} = 1{,}1317$$

Convertendo o Log:

$$\mathrm{Ia} = 10^{1{,}1317} = 13{,}513\mathrm{kA}$$

- **2° cálculo de energia incidente**

Sabendo que:

- Log: logaritmo na base 10;
- En: Energia incidente (j/cm^2);
- Supondo uma distância do arco à pessoa de 910 mm;
- K1: -0,555, se tratando de painel;
- K2: 0,113, pois o sistema não é aterrado por alta resistência;
- G: 25mm, distância entre condutores;
- Log Ia: 1,1317.

Logo, substituindo os valores na equação 4:

$$\log En = K1 + K2 + 1{,}081 * \log Ia + 0{,}0011 * G$$

$$\log En = (-0{,}555) + (0{,}113) + 1{,}081 * (1{,}1317) + 0{,}0011 * 25$$

$$\log Ia = 0{,}8089$$

Em seguida, convertendo:

$$En = 10^{0{,}8089} = 6{,}44\ j/cm^2$$

Sabendo que:

- E: Energia incidente (cal/cm^2);
- C_f: 1,0 para tensão de 0,380kV;
- D: distancia típica de trabalho, 457mm.
- t: tempo de abertura do dispositivo para interromper o arco, fator 1,641s.

Finalmente, converte-se para energia incidente a partir da energia normalizada, aplicando a equação 6:

$$E = 4{,}184 * Cf * En * \left(\frac{t}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$E = (1{,}5) * (6{,}44) * \left(\frac{0{,}300}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^{1{,}641}}{457^{1{,}641}}\right)$$

$$E = 23{,}27\ cal/cm^2$$

➢ **3° cálculo da distância de segurança**

Sabendo que:

- D_b: distância de segurança em mm;
- E_b: valor que representa a mínima energia além da qual as queimaduras de segundo grau ocorrem, 5.

Logo, substituindo na equação 7, obter a distância de segurança, Db:

$$\mathrm{Db} = \left[4{,}184 * \ \mathrm{Cf} * \ \mathrm{En} * \left(\frac{\mathrm{t}}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^{10}}{\mathrm{Eb}}\right)\right]^{1/\mathrm{x}}$$

$$\mathrm{Db} = \left[4{,}184 * \ (1{,}5) * (6{,}44) * \left(\frac{0{,}300}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^{1{,}614}}{5}\right)\right]^{1/1{,}641}$$

$$\mathrm{Db} = 2790{,}70 \text{ mm} = 2{,}79\text{m}$$

Como resultado apresentar a sinalização de advertência com os valores obtidos nos cálculos, conforme a Figura 3.

Figura 3: placa de sinalização de advertência com resultados dos cálculos 380V

Para nível de tensão **13,8kV**, abaixo todos os cálculos detalhados.

➢ **1° cálculo de corrente de arco elétrico**

Sabendo que:

- Log= logaritmo na base 10;
- Ia = corrente do arco elétrico, em kA;
- K = -0,097, se tratando de painel;
- I_{bf} = Corrente de curto circuito para falta trifásica, 45kA;
- V = tensão do sistema 13,8kV;
- G = distância entre condutores, 152mm

Logo, substituindo os valores na equação 2:

$$\log Ia = 0{,}00402 + 0{,}983 \log Ibf$$

$$\log Ia = 0{,}00402 + 0{,}983 \log 45$$

$$\log Ia = 1{,}629$$

Convertendo o Log:

$$Ia = 10^{1{,}629} = 42{,}57kA$$

- **2° cálculo de energia incidente**

Sabendo que:

- Log: logaritmo na base 10;
- En: Energia incidente (j/cm^2);
- Supondo uma distância do arco à pessoa de 910 mm;
- K1: -0,555, se tratando de painel;
- K2: 0,113, pois o sistema não é aterrado por alta resistência;
- G: 152mm, distância entre condutores;
- Log Ia: 1,6291kA.

Logo, substituindo os valores na equação 4:

$$\log En = K1 + K2 + 1{,}081 * \log Ia + 0{,}0011 * G$$

$$\log En = (-0{,}555) + (0{,}113) + 1{,}081 * (1{,}6291) + 0{,}0011 * 152$$

$$\log En = 1{,}4862$$

Em seguida, convertendo:

$$\mathrm{En} = 10^{\,1{,}4862} = 30{,}63\ \mathrm{j/cm^2}$$

Sabendo que:

- E: Energia incidente (cal/cm^2);
- C_f: 1,0 para tensão de 13,8kV;
- D: distancia típica de trabalho, 910mm.
- t: tempo de abertura do dispositivo para interromper o arco, 0,973s.

Finalmente, converte-se para energia incidente a partir da energia normalizada, aplicando a equação 6.

$$\mathrm{E} = 4{,}184 * \mathrm{Cf} * \mathrm{En} * \left(\frac{\mathrm{t}}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^{\mathrm{x}}}{\mathrm{D}^{\mathrm{x}}}\right)$$

$$\mathrm{E} = (1{,}0) * (30{,}63) * \left(\frac{0{,}300}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^{0{,}973}}{910^{0{,}973}}\right)$$

$$\mathrm{E} = 31{,}132\ \mathrm{cal/cm^2}$$

- **3° cálculo da distância de segurança**

Onde:

- D_b: distância de segurança em mm;
- E_b: valor que representa a mínima energia além da qual as queimaduras de segundo grau ocorrem.

Logo, substituindo na equação 7, obter a distância de segurança, Db:

$$\mathrm{Db} = \left[4{,}184 * \mathrm{Cf} * \mathrm{En} * \left(\frac{\mathrm{t}}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^{10}}{\mathrm{Eb}}\right)\right]^{1/\mathrm{x}}$$

$$\mathrm{Db} = \left[4{,}184\ \mathrm{x}\ (1{,}0) * (16{,}97) * \left(\frac{0{,}300}{0{,}2}\right) * \left(\frac{610^{0{,}973}}{5}\right)\right]^{1/0{,}973}$$

$$\mathrm{Db} = 14143\ \mathrm{mm} = 14{,}1\mathrm{m}$$

Como resultado apresentar a sinalização de advertência com os valores obtidos nos cálculos, conforme a Figura 4.

PERIGO

RISCO DE ARCO ELÉTRICO E CHOQUE ELÉTRICO
SOMENTE PROFISSIONAL AUTORIZADO
SEGUIR OS PROCEDIMENTO ESPECÍFICO PARA INTERVENÇÃO EM PAINEL

LOCAL	NÍVEL DE TENSÃO	ENERGIA INCIDENTE (ATPV)
CUBICULO	13.800V	31,1 cal/cm²

ZONA CONTROLADA	ZONA DE RISCO
1380 mm	380 mm

DISTÂNCIA SEGURA DE APROXIMAÇÃO EM ATIVIDADE SUJEITA A ARCO ELÉTRICO

910 mm

EPIs OBRIGATÓRIOS

- Vestimenta resistente a arco elétrico RISCO 04 - Protetor facial resistente a arco elétrico - Capacete	- Óculos de segurança - Luvas Classe 02 - Calçado de segurança

Figura 4: placa de sinalização de advertência com resultados dos cálculos

Pelo resultado dos cálculos de distância de segurança, tanto para painel 01 quanto 02, percebe-se que a distância é muito alta, talvez até ultrapassando as dimensões da sala dos painéis, porém as proteções atuam na extinção do arco com menor tempo de operação.

A partir dos resultados obtidos, pode-se fazer algumas avaliações com utilização do recurso gráfico para facilitar a compreensão do comportamento da variação entre a distância de trabalho e o nível de energia incidente conforme calculado. A distância considerada no gráfico 910mm é a típica de trabalho conforme norma IEEE, para este nível de tensão, em relação a energia incidente 31cal/cm², obtida nos cálculos para 13,8kV.

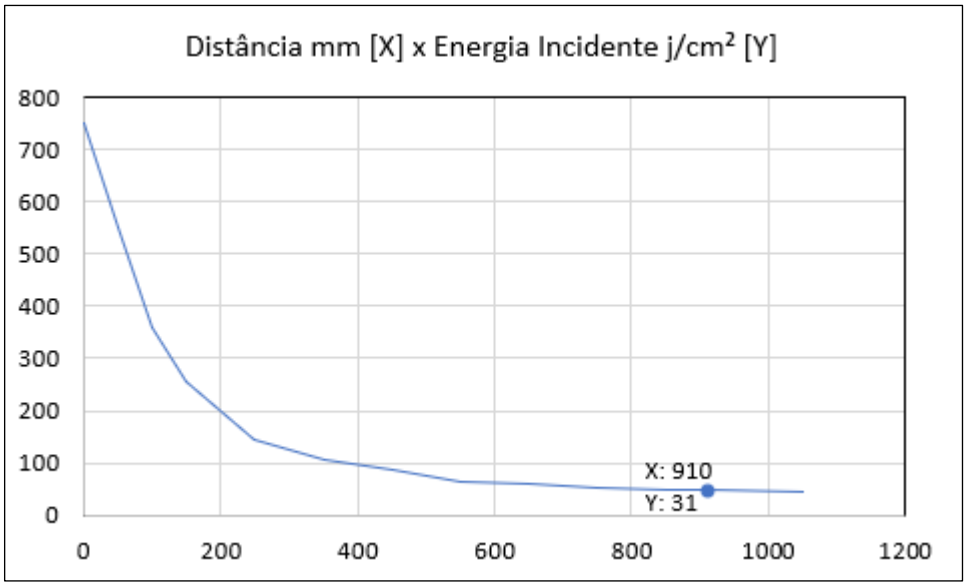

Figura 5: Representação gráfica de Energia Incidente x Corrente de Arco Elétrico

Outra analise interessante é energia incidente em relação ao tempo de atuação da proteção, que se pode observar que quanto mais rápido a atuação do disjuntor de proteção para interromper o arco menor será o nível de energia incidente.

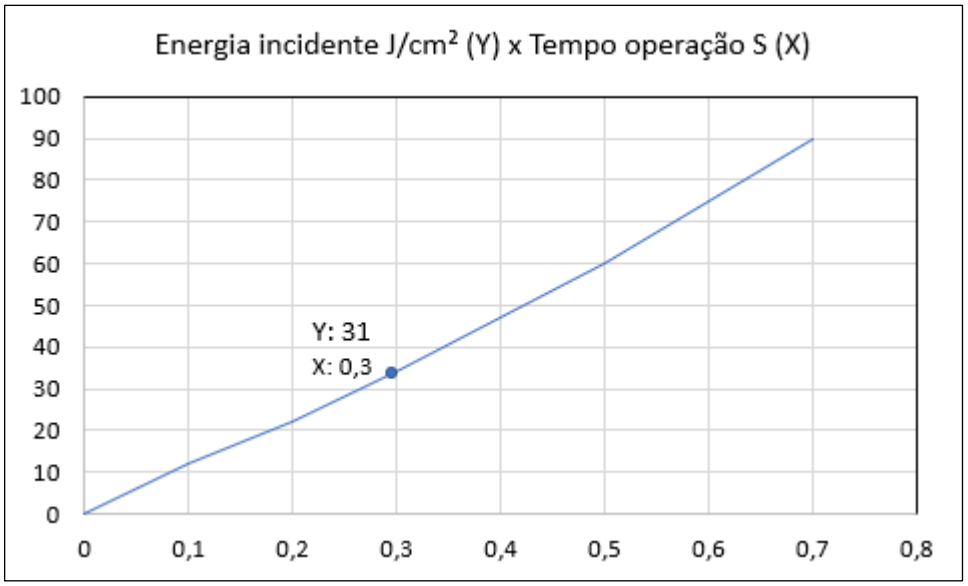

Figura 6: Energia Incidente (Y) x Tempo de Operação (X)

Portanto, uma proposta de solução é avaliar o ajuste no tempo de operação da proteção atuando mais rapidamente, interrompendo o arco, consequentemente o aumento da energia incidente.

7. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi apresentar a metodologia utilizada para a cálculo da energia incidente em painéis elétricos, tanto quanto sua importância e relevância dado o risco, complexidade e suas características, desde a apresentação do arco elétrico, suas consequências e causas, que variam de queimaduras de grau leve até a fatalidade de um trabalhador quanto a danos materiais, e através do resultado obter as condições de segurança para as pessoas e instalações.

A metodologia detalhada no capítulo 5 e utilizada como material orientativo no passo a passo para o cálculo da energia incidente, foi aplicada no capítulo 6, abordando um estudo de caso de uma estrutura comum em painéis elétricos na região. Assim foi possível determinar o fator de influência e risco proveniente de um circuito elétrico energizado, sendo assim permitindo conhecer, entender e aplicar metodologias de proteção e mitigação de qualquer acidente com arco elétrico envolvendo pessoas ou equipamentos.

O estudo apresentou o cálculo de energia incidente com resultados distintos quando aplicado em níveis de tensões diferentes, no caso 13,8kV e 380V, onde percebe-se que o nível de energia incidente e a distância segura de trabalho são distintas, porém todas com capacidade de danos irreversíveis principalmente se tratando da vida de trabalhadores envolvidos nas atividades.

Por fim, pode-se determinar através destes estudos o nível de cuidado e prevenção para instalação, manobras e manutenções destes equipamentos, podendo orientar, treinar e proteger todas as pessoas envolvidas em qualquer tipo de atividade com eletricidade nestes equipamentos, e baseado no conhecimento do risco estabelecer barreiras mitigatórias deste fenômeno, extremamente rápido e perigoso.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

L. K. Fischer, **"The Dangers of Arc-Flash Incidents"**, Maintenance Technology, fevereiro de 2004.

F. L. Claudio, **"Fatores que influenciam na mortalidade em queimaduras graves"**, Faculdade Evangélica Mackeinzie do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2021.

Luiz K. Tomiyoshi, **"Vestimenta de proteção contra queimaduras por arco elétrico",** https://www.voltimum.com.br/artigos/artigos-tecnicos/vestimenta-de-protecao, 2015.

L.K. Tomiyoshi, **"Vestimenta de Proteção Contra Queimaduras por Arcos Elétricos"**, Eletricidade Moderna, Junho 2000.

R.H.Lee, **"The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns",** IEEE Transactions on Industry Applications, vol.18, nº 3, 1982, pp. 246-251, 2002.

"IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations", IEEE Industry Applications Society, 27 September 2018, revision of IEEE 1584-2002 as amended by IEEE Std 1584-2004.

"IEEE std. 1584 Guide for performing arc-flash hazard calculations", IEEE Industry Applications Magazine, 2002.

"Relatório Técnico: Especificação de uma Vestimenta de Proteção Contra Arco Elétrico", junho de 2008.

Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora n.6 (NR-10) Segurança em instalações e serviços em eletricidade**, Brasília, 2004.

Autores

R. Alan e S. Eduardo, **"A IEEE 1584 e os métodos para cálculo de energia incidente e distância segura de aproximação"** Capítulo V.

Luiz Carlos Catelani Junior. **"Cálculo de energia incidente"** – Modelo IEEE 1584 – Edição 2018 baixa tensão, capítulo II.

Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora n.6 (NR-06) Equipamento de Proteção Individual**, Brasília, 2001.

RELATÓRIO FINAL DE CURSO Nº 24/2025 - DENP (11.62.04)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 26/05/2025 13:55)
FELIPE DE SOUZA DELGADO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DENP (11.62.04)
Matrícula: ###834#6

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/documentos/ informando seu número: ***24****, ano:* ***2025****, tipo:* ***RELATÓRIO FINAL DE CURSO****, data de emissão:* ***26/05/2025*** *e o código de verificação:* ***507724a4c9***